中国生态农业学报 2016年6月 第24卷 第6期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2016, 24(6): 780−789

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150981

基于重组自交系群体水稻氮素利用效率分析和利用*

阮新民　施伏芝　从夕汉　罗志祥**

(安徽省农业科学院水稻研究所/国家水稻改良中心合肥分中心/安徽省水稻遗传育种重点开放实验室　合肥　230031)

摘　要　本文以水稻重组自交系群体为试验材料，设置不施氮与施低氮(150 kg·hm^{-2})两种处理的大田试验，研究了水稻重组自交系群体氮素吸收利用及主要农艺性状分布特征，并通过相关、聚类、主成分等统计方法阐明性状间的相互关系，为氮素高效利用水稻新品种培育提供理论依据。结果表明，水稻重组自交系群体的氮素利用效率性状在施氮150 kg·hm^{-2}条件下的变异系数较大；施氮促进了群体穗、茎秆、叶氮含量的增加和单株干物质总量(包括单株穗重、单株茎秆重和单株叶重)的提高。在两种氮环境下，氮素干物质生产效率均与株高、穗长、单株茎秆重、单株干物质总量呈正相关，与茎秆氮含量、叶氮含量、穗氮含量呈负相关；氮素籽粒生产效率均与单株谷重、结实率、千粒重、穗总粒数和穗长呈正相关，与单株茎秆重、叶氮含量、单株叶重、单株氮素积累总量呈负相关。逐步回归分析结果显示，茎秆氮含量、穗氮含量和单株茎秆重对氮素干物质生产效率影响尤为显著，而对氮素籽粒生产效率影响更为显著的是穗数、穗总粒数与结实率。主成分分析表明，氮利用效率较高时，植株体内氮含量较低，尤其是茎秆的氮含量。因此，在大田低氮条件下，要注重筛选植株较高、茎秆较重的重穗型(穗较长，穗总粒数较多，结实率较高)株系；且具有较低茎秆与穗氮含量，尤其是较低的茎秆氮含量，将有利于氮高效利用水稻新品种的选育。从中选出的氮高效品系如Q149与氮低效品系Q114等优良品系13份，可作为优质资源研究使用。

关键词　水稻　重组自交系　施氮量　氮素利用效率　农艺性状
中图分类号: S511.1; S311　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2016)06-0780-10

Analysis of rice nitrogen use efficiency based on recombinant inbred line population*

RUAN Xinmin, SHI Fuzhi, CONG Xihan, LUO Zhixiang**

(Institute of Rice Research, Anhui Academy of Agricultural Sciences / Hefei Branch of National Rice Improvement Center / Key Laboratory of Rice Genetics and Breeding of Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract　Nitrogen is the most critical input limiting rice productivity. Due to increasing fertilizer costs and environmental concerns, nitrogen use efficiency (NUE) is hotly debated in the scientific community. To explore the absorption, utilization and main traits distribution patter of nitrogen in recombinant inbred lines (RILs), a field experiment was conducted to evaluate potential NUE of rice (*Oryza sativa* L.). The split-plot experiment had two treatments (one without nitrogen fertilizer and the other with 150 kg·hm^{-2} of nitrogen) for populations of RILs, the parents and the check line Q149. The relationship between NUE and the main agronomic characteristics of RILs population was determined using statistical correlation, clustering, principal component analyses. The results showed that the variation coefficient of NUE was larger under 150 kg·hm^{-2} nitrogen

* 安徽省农业科学院学科建设项目(16A0101)、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA101103)、安徽省自然科学基金项目(1608085QC67)和安徽省农业科学院院长青年创新基金项目(16B0102)资助
** 通讯作者：罗志祥，主要从事水稻遗传育种研究。E-mail: lzx6176@126.com
阮新民，主要从事水稻遗传育种研究。E-mail: ruan_xm@126.com
收稿日期: 2015−09−09　接受日期: 2016−02−02

* The study was supported by the Projects of Anhui Academy of Agricultural Sciences for Subject Building (16A0101), the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA101103), the Natural Science Foundation of Anhui, China (1608085QC67) and the Youth Science and Technology Innovation Fund of President of Anhui Academy of Agricultural Sciences (16B0102).
** Corresponding author, E-mail: lzx6176@126.com
Received Sep. 9, 2015; accepted Feb. 2, 2016

treatment than under non-nitrogen treatment. Proper increase in nitrogen fertilization was beneficial to nitrogen content in rice panicle, stem and leaf, and to total dry matter weight of single plant. Significantly positive correlations were noted between dry matter production efficiency and plant high, panicle length, stem weight per plant, total dry matter weight of single plant under two nitrogen treatments. Also under both treatments, significantly negative correlations were noted between dry matter production efficiency and the contents of nitrogen in rice stem, leaf and panicle. There were positive correlations between grain production efficiency and grain weight per plant, seed setting rate, thousand-seed weight, total number of grains per panicle, and spike length. Equally, there were negative correlations between grain production efficiency and stem weight per plant, leaf nitrogen content, leaf weight per plant and total amount of nitrogen per plant. Stepwise regression analysis indicated that nitrogen content in stem and panicle, and stem weight per plant had significant effects on dry matter NUE. However, the effects of number of panicles per plant, number of grains per panicle and seed setting rate on grain NUE were more significant in the two treatments. Principal component analysis showed that the nitrogen content in rice plant, especially in stem, decreased with increasing of NUE. Therefore, in low-nitrogen field, it was necessary to select heavy-panicle type variety that was high in stem weight (including long panicle length, more grains per panicle and high seed-setting rate) in breeding programs. Furthermore, lower nitrogen content in stem and panicle (especially in stem) benefited the breeding for high NUE. Based on the study, 7 rice lines with high NUE (e.g., Q149) and 6 lines with low NUE (e.g., Q114) were selected for special germplasm in rice breeding projects.
Keywords　Rice; Recombinant Inbred Line; Nitrogen fertilization rate; Nitrogen use efficiency; Agronomic trait

氮是限制水稻产量的关键因素之一，而氮肥的过量投入对生态环境及农业可持续发展造成了极大危害。培育氮高效利用水稻新品种成为育种家重要的目标。过去遗传选择往往是在高背景氮下进行，以应对较高的氮肥投入，而高背景氮掩盖了氮吸收与利用基因型间差异[1]。因此，在低氮条件下进行选择被认为是选育氮高效利用水稻品种的重要途径[2–3]。已有研究表明，在未施氮水平下，单株谷重与株高、穗数、穗粒数和单株草重的相关性以及单株谷重的氮素反应指数与穗数、单株谷重、单株草重和谷草比的相关性比施低氮或普通施氮水平更为密切[4]。水稻植株氮积累量随施氮水平的增加迅速提高，但施氮超过 225 kg·hm^{-2}后，水稻吸氮量基本保持不变[5]。前人研究大多集中在氮利用效率与产量和重要农艺性状间的关系方面，如高产基因型水稻在各个生育阶段的氮素积累量、抽穗前的氮素吸收速率及氮素利用效率均较高[6]；水稻氮素利用效率与成熟期茎秆和叶片的氮含量显著负相关等[7]。但研究的材料大多是收集到的推广应用品种或骨干亲本材料[8–14]，这些材料具有不同遗传背景，且大多农艺性状优良；甚至杂交种还包括杂种优势。对于氮高效水稻新品种选育来说，分离后代群体不仅有优势群，还包括劣势群。因此，本研究利用氮高效和低效水稻亲本杂交重组自交系 F_9 群体，调查氮吸收利用部分参数及主要农艺性状，并对各参数与氮利用效率进行相关与主成分分析，明确氮高效利用水稻群体性状特征，选出贡献较高的性状参数作为指标进行氮利用效率评价，这对目前仍采用传统方法进行氮高效新品种选育具有现实的指导意义，也为进一步研究水稻氮高效利用生理生化及分子生物学机制提供材料基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2010 年 5—10 月在安徽省肥东杨店试验基地进行。供试土壤为黄白土，基本理化性质为全氮 0.95 g·kg^{-1}，碱解氮 116 mg·kg^{-1}，速效磷 15.1 mg·kg^{-1}，速效钾 135 mg·kg^{-1}，有机质含量 15.33 g·kg^{-1}。试验材料采用籼粳杂交后代氮高效水稻品种‘Dasanbyeo’与温带粳稻氮低效水稻品种‘TR22183’构建的重组自交系群体(Dansanbyeo/TR22183；F_9，由上海农业科学院提供)，由 163 个家系组成；对剔除异常数据后的 138 个家系及亲本材料与选育的对照新品系 Q149[15]进行统计分析。

1.2　试验方法

两因素裂区设计；以不施氮(N0)、低氮[N150, 150 kg(N)·hm^{-2}]为主区，品系为副区。主区之间田埂用塑料薄膜隔开。裂区随机区组排列，3 次重复。每个材料种植 5 行，每行 11 株，株行距 16.7 cm×20 cm，单本栽插。以尿素作为氮源，按基肥∶分蘖肥∶穗肥为 4∶3∶3 分次施入，磷肥用钙镁磷肥(含 P_2O_5 15%)，钾肥用氯化钾(含 K_2O 60%)，全部作基肥。磷肥施用量为 375 kg·hm^{-2}，钾肥用量 225 kg·hm^{-2}。5 月 7 日播种，6 月 6 日移栽。病虫草害防治和灌溉等按一般大田生产管理。

1.3　测定项目

在成熟期普查穗数(茎蘖数)的基础上，每个小

区取有代表性的5株样品，切掉根部后，将茎、叶、穗分开并在105 ℃烘箱中干燥，测定其干物质量，粉碎后，采用全自动氮素分析仪(BUCHI 339)测定样品各器官氮含量。另取5株进行考种，主要考察株高、穗数、穗长、穗总粒数、穗实粒数、千粒重和单株谷重。

氮素干物质生产效率(NDMPE)：单位面积植株干物质总量与单位面积植株氮素积累总量的比值。

氮素籽粒生产效率(NGPE)：单位面积稻谷产量与单位面积植株氮素积累总量的比值。

1.4 数据处理

利用SPSS 19.0统计软件进行自交系群体性状的描述性统计、相关分析、聚类分析与主成分分析。

2 结果与分析

2.1 重组自交系群体主要性状统计与分析

性状变异系数可以为品种改良的目标性状选择及栽培措施的实施提供参考。对Dasanbyeo/TR22183重组自交系138个品系在不同施氮水平下的主要性状变异进行统计(表1)，可以看出该群体各品系间氮

表1 不同施氮量下水稻重组自交系品系性状测定结果统计

Table 1 Statistics of traits values of lines in rice RILs under two nitrogen application rates conditions

性状 Trait	施氮量 N application rate (kg·hm^{-2})	最小 Minimum	最大 Maximum	平均 Mean	标准差 Std. deviation	变异系数 CV (%)
单株干物质总量 TDW (g)	0	15.11	38.33	25.89	4.27	16.50
	150	17.11	47.70	31.61**	5.40	17.10
单株茎秆重 STW (g)	0	5.08	16.91	9.86	2.38	24.12
	150	5.98	17.93	10.28*	2.62	25.53
单株叶重 LW (g)	0	2.03	6.49	4.13	0.94	22.78
	150	2.71	12.85	5.83**	1.84	31.57
单株穗重 PW (g)	0	6.31	19.52	11.89	2.80	23.53
	150	6.78	24.12	15.49	3.80	24.55
茎秆氮含量 STN (g·kg^{-1})	0	5.10	11.54	8.31	1.29	15.56
	150	5.95	17.67	11.27**	2.18	19.37
叶氮含量 LN (g·kg^{-1})	0	8.26	19.36	13.04	2.00	15.33
	150	12.19	26.35	18.51**	2.82	15.26
穗氮含量 PN (g·kg^{-1})	0	12.16	17.76	14.99	0.99	6.60
	150	13.62	20.56	16.67**	1.32	7.92
单株氮积累总量 TN (g)	0	0.19	0.42	0.31	0.05	14.79
	150	0.30	0.80	0.48**	0.08	17.34
氮素干物质生产效率 NDMPE (g·g^{-1})	0	70.00	94.71	83.04	5.73	6.90
	150	51.15	83.02	66.03**	5.85	8.85
氮素籽粒生产效率 NGPE (g·g^{-1})	0	6.29	50.87	28.95	8.38	28.93
	150	4.24	46.52	22.56**	9.26	41.06
株高 PH (cm)	0	55.00	120.50	82.44	10.91	13.24
	150	56.00	110.00	85.31**	9.25	10.85
穗数 NP	0	4.30	11.60	6.96	1.59	22.79
	150	2.90	12.40	7.24	2.26	31.27
穗长 PL (cm)	0	15.82	27.25	21.25	2.29	10.78
	150	16.35	27.30	21.63	1.84	8.49
穗总粒数 NG	0	47.60	198.00	110.29	27.92	25.31
	150	51.40	180.05	113.74	22.80	20.04
结实率 SSR (%)	0	12.03	82.56	54.90	15.00	27.32
	150	24.84	78.02	60.06**	10.32	17.18
千粒重 TSW (g)	0	13.83	31.30	22.47	3.39	15.09
	150	11.63	27.89	21.70*	2.99	13.79
单株谷重 GW (g)	0	1.73	15.90	8.84	2.63	29.72
	150	4.29	20.80	12.18**	3.47	28.52

TDW：单株干物质总量；STW：单株茎秆重；LW：单株叶重；PW：单株穗重；STC：茎秆氮含量；LN：叶氮含量；PN：穗氮含量；TN：单株氮积累总量；NDMPE：氮素干物质生产效率；NGPE：氮素籽粒生产效率；PH：株高；NP：穗数；PL：穗长；NG：穗总粒数；SSR：结实率；TSW：千粒重；GW：单株谷重。在两种氮水平下，*表示$P<0.05$差异显著，**表示$P<0.01$差异极显著。下同。TDW: total dry matter weight per plant; STW: stem weight per plant; LW: leaf weight per plant; PW: panicle weight per plant; STC: stem nitrogen content; LN: leaf nitrogen content; PN: panicle nitrogen content; TN: total nitrogen accumulation per plant; NDMPE: nitrogen dry matter production efficiency; NGPE: nitrogen grain production efficiency; PH: plant high; NP: panicle number per plant; PL: panicle length; NG: grain number per panicle; SSR: seed setting rate; TSW: 1000-seed weight; GW: grain weight per plant. * and ** mean significant difference between two nitrogen application rates at levels 0.05 and 0.01, respectively. The same below.

素干物质生产效率和氮素籽粒生产效率在 2 种施氮水平下均存在较大差异; 且在 150 kg·hm^{-2} 条件下变异系数较大。氮素干物质生产效率分布于 51.15~83.02 g·g^{-1}, 氮素籽粒生产效率分布于 4.24~46.52 g·g^{-1}。施氮促进群体植株平均含氮量的提高, 主要农艺性状除千粒重表现为降低外, 其余均表现为增加。不同性状各品系的平均值在两种施氮水平下的差异, 除穗数、穗长及穗总粒外, 其余均为显著或极显著。

2.2 氮高效利用与氮低效利用品系性状表现

采用 K-均值聚类法, 以氮素利用效率性状(氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率)为变量对群体品系进行聚类, 并对分组结果进行性状特征分析。剔除异常值后群体中的 138 个品系被分为 3 组(表 2), 其中在 N150 条件下, 第 1 组有 65 个品系, 第 2 组有 37 个品系, 第 3 组有 36 个品系(包括选育的新品系 Q149)。对分组结果进行方差分析与多重比较分析, 结果表明, 组内各性状差异不显著, 组间差异明显, 多性状差异达显著水平。第 3 组品系的氮利用效率和单株谷重显著高于其他两组。说明在氮高效利用组中能选到高产的品系, 即高产氮高效利用品系。单株氮积累总量在组间差异均不显著。

构建重组自交系(RIL)群体的同时, 也是自交选育新品种的过程。根据自交系群体分别在 2 个氮条件下的聚类结果, 找出其中 7 个品系(包括选育的新品系 Q149, 其余分别为 Q096、Q153、Q048、Q091、Q128、Q22)在 2 种氮水平下均能重复出现在氮高效利用组, 可以初步认为是氮高效品系; 6 个品系(Q114、Q104、Q060、Q118、Q135、Q151)均出现在氮低效利用组, 称之为氮低效品系(表 3); 其与 2 个亲本和对照新品系 Q149 主要性状列于表 3。从表 3 中可以看出, 在氮高效利用组中 7 个品系的氮素干物质生产效率与氮素籽粒生产效率平均值比氮低效利用效率组中 6 个品系平均值分别高 36.12%和 33.81%; 其中选育的新品系 Q149 比氮高效利用亲本 Dasanbyeo 分别高 6.22%和 2.57%, 表现出一定的超亲优势。通过比较两组结果也可以看出, 在低氮条件下氮高效利用水稻具有较高的株高、单株谷重和生物量, 穗大, 茎秆与叶的氮含量较低, 尤其是茎秆的氮含量显著降低。

表 2 不同施氮量下水稻重组自交系氮素利用效率性状聚类分析

Table 2 Cluster analysis of rice RILs traits based on the nitrogen use efficiency under two nitrogen application rates conditions

施氮量 N application rate (kg·hm^{-2})	0				150			
聚类分组编号 Cluster number	1	2	3	平均 Mean	1	2	3	平均 Mean
品系数 Line number	59	42	37		65	37	36	
穗氮含量 PN (g·kg^{-1})	15.35A	15.21A	14.18B	14.99	18.31A	16.69B	15.01C	16.67
单株穗重 PW (g)	11.73B	10.78B	13.41A	11.89	14.81A	15.70A	16.00A	15.52
茎秆氮含量 STN (g·kg^{-1})	9.34A	7.75B	7.30C	8.31	12.22A	11.47B	10.03C	11.27
单株茎秆重 STW (g)	8.54C	11.77A	9.80B	9.86	9.33B	11.36A	10.17B	10.24
叶氮含量 LN (g·kg^{-1})	13.08A	13.76A	12.16B	13.04	19.36A	19.12A	17.02B	18.51
单株叶重 LW (g)	3.60B	4.66A	4.39A	4.13	5.43B	6.55A	5.50B	5.78
单株干物质总量 TDW (g)	23.87B	27.21A	27.60A	25.89	29.57B	33.62A	31.68AB	31.54
单株氮积累总量 TN (g)	0.31A	0.32A	0.32A	0.31	0.46A	0.49A	0.49A	0.48
株高 PH (cm)	76.35C	84.02B	90.35A	82.44	83.46B	83.92B	88.67A	85.31
穗数 NP	7.14A	7.19A	6.42A	6.96	7.77A	5.82B	8.13A	7.23
穗长 PL (cm)	20.58B	21.02B	22.57A	21.25	21.43B	21.14B	22.33A	21.61
每穗总粒数 NG	107.83A	107.48A	117.40A	110.29	115.31A	105.18C	120.84A	113.70
结实率 SSR (%)	57.48B	42.99C	64.30A	54.90	59.77B	55.76B	64.74A	59.93
千粒重 TSW (g)	22.74A	20.73B	23.99A	22.47	21.51AB	21.12B	22.49A	21.71
单株谷重 GW (g)	9.33B	6.33C	10.91A	8.84	12.36B	9.87C	14.37A	12.18
氮素干物质生产效率 NDMPE (%)	77.98C	85.77B	88.02A	83.04	60.10C	67.58B	70.63A	66.14
氮素籽粒生产效率 NGPE (%)	31.18B	20.01C	35.57A	28.95	22.34B	14.05C	31.49A	22.61

同行相同施氮量不同大写字母表示差异显著(P<0.05)。The data of the same nitrogen application rate with different capital letters are significant difference (P < 0.05).

2.3 氮素利用效率与其他性状的关系

通过分析氮素利用效率与主要农艺性状的关系可以看出(表 4), 各品系在 N0 和 N150 氮水平下, 氮素干物质生产效率均与株高(r=0.593**、r=0.271**)、穗长(r=0.318**、r=0.186*)、单株茎秆重(r=0.485**、r=0.320**)和单株干物质总量(r=0.426**、r=0.331**)

表 3 不同施氮量下水稻重组自交系不同氮利用效率典型品系的性状表现

Table 3 Performance of typical lines of rice RILs with the difference nitrogen use efficiencies under two nitrogen application rates conditions

组 Group	品系 Line	PN ($g\cdot kg^{-1}$)	PW (g)	STN ($g\cdot kg^{-1}$)	STW (g)	LN ($g\cdot kg^{-1}$)	LW (g)	TDW (g)	TN (g)	PH (cm)	NP	PL (cm)	NG	SSR (%)	TSW (g)	GW (g)	NDMPE ($g\cdot g^{-1}$)	NGPE ($g\cdot g^{-1}$)
氮高效利用品系 Lines with high nitrogen use efficiency	Q096	13.71	12.46	7.34	10.26	14.82	5.13	27.85	0.322	98.8	5.8	22.9	119.3	72.7	21.5	10.9	86.45	33.83
	Q153	13.85	15.92	7.36	9.84	16.04	5.49	31.24	0.381	84.8	9.1	21.0	91.1	76.0	22.6	13.3	82.00	34.91
	Q048	15.14	12.31	8.42	11.25	12.78	4.17	27.73	0.334	95.3	8.4	20.6	95.6	60.4	21.9	10.1	82.93	30.20
	Q091	16.47	10.84	7.72	14.75	13.42	5.99	31.58	0.373	105.0	6.5	22.7	118.0	48.3	27.0	10.1	84.71	27.09
	Q128	14.87	12.19	8.86	16.10	13.14	5.16	33.44	0.392	91.5	7.3	20.7	95.4	63.7	24.6	10.5	85.37	26.81
	Q22	14.78	12.78	8.14	11.10	12.09	5.71	29.58	0.348	97.0	8.5	21.8	109.9	60.0	24.2	12.6	84.93	36.18
	Q149	13.56	17.19	7.29	11.92	13.43	5.98	35.09	0.400	97.8	6.4	22.8	110.4	69.2	26.7	13.6	87.66	33.97
	平均值 Mean	14.63	13.38	7.88	12.17	13.67	5.38	30.93	0.364	95.7	7.4	21.8	105.7	64.3	24.1	11.6	84.86	31.86
	亲本 Parent Dasanbeyo	15.35	12.41	7.32	8.81	12.34	5.93	27.08	0.328	88.5	7.2	18.8	75.8	66.2	23.5	10.9	82.52	33.12
氮低效利用品系 Lines with low nitrogen use efficiency	Q114	18.83	12.37	12.05	7.19	15.86	3.51	23.06	0.375	72.8	5.7	20.4	108.3	64.0	23.0	8.7	61.45	23.19
	Q104	16.86	11.59	13.13	7.71	17.45	3.69	22.98	0.361	66.8	7.4	19.7	77.8	46.9	20.9	7.9	63.65	21.88
	Q060	16.98	10.99	13.19	8.32	19.25	3.11	22.41	0.356	71.8	10.0	18.0	76.5	52.0	19.9	7.8	62.91	21.90
	Q118	17.91	14.67	11.70	8.66	16.37	3.92	27.25	0.428	74.8	5.7	20.6	96.9	60.8	20.9	9.7	63.63	22.65
	Q135	16.93	9.60	14.00	6.89	18.27	3.42	19.90	0.321	72.5	9.9	20.1	78.0	54.4	19.5	8.2	61.90	25.51
	Q151	18.57	10.80	13.93	7.08	15.52	3.49	21.37	0.353	65.8	11.9	17.7	72.7	61.5	19.7	9.8	60.48	27.73
	平均值 Mean	17.68	11.70	13.00	7.64	17.12	3.52	22.83	0.366	70.8	8.4	19.4	85.0	56.6	20.7	8.7	62.34	23.81
	亲本 Parent TR11283	17.43	12.70	15.34	8.02	18.32	3.92	27.56	0.416	78.5	9.0	20.6	86.3	46.5	20.2	8.7	66.22	20.90

表 4 不同施氮量下水稻重组自交系氮利用性状与主要性状的相关分析(n=138)

Table 4 Correlation between nitrogen use efficiency and main traits of rice RILs under two nitrogen application rates conditions

	PN	PW	STN	STW	LN	LW	TDW	TN	PH	NP	PL	NG	SSR	TSW	GW	NDMPE	NGPE
PN		−0.462**	0.226**	0.069	0.054	−0.186*	−0.305**	−0.137	−0.249**	0.112	−0.321**	−0.106	−0.224**	−0.260**	−0.393**	−0.469**	−0.339**
PW	−0.245**		−0.104	−0.030	−0.417**	0.308**	0.707**	0.755**	0.218*	−0.153	0.260**	0.196*	0.404**	0.443**	0.681**	0.065	0.300**
STN	0.439**	−0.133		−0.273**	0.103	−0.498**	−0.330**	−0.006	−0.399**	0.192*	−0.261**	−0.201*	−0.047	0.142	−0.024	−0.823**	−0.023
STW	−0.201*	−0.101	−0.332**		0.177*	0.587**	0.667**	0.513**	0.506**	0.080	0.208*	0.127	−0.389**	−0.065	−0.239**	0.485**	−0.530**
LN	0.053	−0.374**	0.181*	0.299**		0.023	−0.170*	−0.088	−0.226**	0.097	0.025	0.055	−0.407**	−0.232**	−0.349**	−0.196*	−0.313**
LW	−0.115	−0.039	−0.325**	0.727**	0.428**		0.750**	0.602**	0.435**	−0.144	0.311**	0.231**	−0.087	−0.075	0.038	0.514**	−0.299**
TDW	−0.309**	0.642**	−0.365**	0.662**	0.027	0.666**		0.913**	0.521**	−0.087	0.354**	0.251**	0.029	0.238**	0.322**	0.426**	−0.165
TN	0.062	0.543**	0.058	0.534**	0.272**	0.641**	0.859**		0.308**	−0.049	0.254**	0.215*	0.032	0.291**	0.350**	0.029	−0.180*
PH	−0.280**	0.182*	−0.213*	0.172*	−0.022	0.116	0.251**	0.117		−0.374**	0.632**	0.398**	0.079	0.207*	0.221**	0.593**	0.060
NP	0.046	−0.107	0.058	−0.068	0.046	0.012	−0.104	−0.061	−0.022		−0.546**	−0.609**	−0.280**	−0.298**	−0.220**	−0.129	−0.226**
PL	−0.216*	0.199*	−0.156	0.003	−0.042	0.019	0.148	0.068	0.575**	0.018		0.641**	0.087	0.192*	0.341**	0.318**	0.200*
NG	−0.047	0.226**	−0.045	−0.028	−0.127	0.006	0.147	0.118	0.425**	−0.089	0.603**		−0.030	−0.035	0.276**	0.140	0.191*
SSR	0.077	0.040	0.010	−0.148	−0.210*	−0.217*	−0.117	−0.128	−0.028	−0.030	−0.031	−0.117		0.231**	0.756**	−0.018	0.773**
TSW	−0.109	0.204*	−0.047	−0.086	−0.236**	−0.160	0.048	−0.032	0.115	−0.125	0.116	−0.004	0.160		0.437**	−0.044	0.317**
GW	−0.075	0.309**	−0.020	−0.166	−0.281**	−0.138	0.090	0.032	0.233**	0.119	0.446**	0.497**	0.429**	0.436**		0.000	0.842**
NDMPE	−0.708**	0.194*	−0.813**	0.320**	−0.453**	0.113	0.331**	−0.187	0.271**	−0.091	0.186*	0.079	0.047	0.157	0.121		−0.019
NGPE	−0.075	0.033	−0.059	−0.351**	−0.382**	−0.359**	−0.270**	−0.366**	0.145	0.596**	0.304**	0.326**	0.353**	0.264**	0.613**	0.182*	

上三角施氮量 0 kg·hm^{-2}，下三角施氮量为 180 kg·hm^{-2}。Above the diagonal is under 0 kg·hm^{-2}, below the diagonal is under 50 kg·hm^{-2} N application rate.

呈正相关，与茎秆氮含量(r=–0.823**、r=–0.813**)、叶氮含量(r=–0.196*、r=–0.453**)和穗氮含量(r=–0.469**、r=–0.708**)呈负相关。氮素籽粒生产效率均与单株谷重(r=0.842**、r=0.613**)、结实率(r=0.773**、r=0.353**)、千粒重(r=0.317**、r=0.264**)、穗总粒数(r=0.191*、r=0.326**)和穗长(r=0.20*、r=0.304**)呈正相关，与单株茎秆重(r=–0.530**、r=–0.351**)、叶氮含量(r=–0.313**、r=–0.382**)、单株叶重(r=–0.299**、r=–0.359**)和单株氮素积累总量(r=–0.180*、r=–0.366**)呈负相关。逐步回归分析结果显示，在N0和N150两种氮水平下，茎秆氮含量、穗氮含量与单株茎秆重均进入氮素干物质生产效率回归方程，而穗数、穗总粒数与结实率均进入氮素籽粒生产效率回归方程，且标准化系数较大，即具有较为重要的影响。

2.4 主成分分析

主成分分析方法是研究相关变量共同关系的技术，可以根据变量在主成分上的得分判断变量的影响程度，对主成分贡献大的变量其影响程度也大[16]。以各品系氮素吸收利用性状与其他主要农艺性状原始数据为基础，利用 SPSS 19.0 软件计算出各主成分的特征向量和贡献率，其中主成分抽取的特征值大于 1(见表 5)。并根据各向量的绝对值将不同性状指标划分到不同的主成分之中。同一指标在各因子中的最大绝对值所在位置即为其所属主成分[17]。从表中可以看出，主成分分析特征值中 5 个成分的累计贡献率达 78.60%，能反映原始变量的大部分信息。

从表 5 可以看出，第 1 主成分中以茎秆氮含量的特征向量值最大，穗氮含量和叶氮含量的特征向量次之；而氮素干物质生产效率与氮素籽粒生产效率的特征向量为负值且绝对值较大。第 1 主成分反映了氮的利用效率情况，称之为氮的利用因子。表明当第 1 主成分氮的利用效率较高时，植株体内氮含量较低，尤其是茎秆的氮含量。第 2 主成分中，单株干物质总量的特征向量值最大，其次是单株叶重、单株秆重与单株氮素积累总量，均与氮的吸收量有关，而氮素籽粒生产效率有较高的负值。因而称第 2 主成分为氮的吸收因子。第 3 主成分中，以单株谷重的特征向量值最大，结实率和单株穗重的次之，而单株秆重则有较高的负值，因而称第 3 主成分为单株产量因子。第 4、5 主成分中，主要由株高、穗数、穗长、穗总粒数提供，可称之为产量构成因子。

表 5 水稻重组自交系各性状主成分的特征向量及贡献率

Table 5 Eigenvectors of principal components of rice RILs and their percentages of accumulated contribution

性状 Trait	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3	主成分 4 Component 4	主成分 5 Component 5
穗氮含量 PN	0.813	0.026	–0.065	–0.072	0.028
单株穗重 PW	0.178	0.482	0.656	0.114	–0.153
茎秆氮含量 STN	0.873	–0.032	0.157	–0.072	–0.006
单株茎秆重 STW	–0.184	0.783	–0.333	0.108	0.039
叶氮含量 LN	0.733	0.395	–0.144	0.073	0.096
单株叶重 LW	0.219	0.841	–0.066	0.121	0.089
单株干物质总量 TDW	0.103	0.924	0.273	0.161	–0.059
单株氮积累总量 TN	0.576	0.752	0.268	0.091	–0.030
株高 PH	–0.171	0.344	0.090	0.679	–0.045
穗数 NP	0.064	0.031	–0.010	–0.237	0.908
穗长 PL	–0.066	0.102	0.132	0.869	–0.069
穗总粒数 NG	0.058	–0.012	0.029	0.870	–0.115
结实率 SSR	0.072	–0.110	0.744	0.004	0.053
千粒重 TSW	–0.269	–0.035	0.571	–0.030	–0.353
单株谷重 GW	0.256	0.106	0.787	0.380	0.163
氮素干物质生产效率 NDMPE	–0.962	–0.122	–0.171	0.057	–0.027
氮素籽粒生产效率 NGPE	–0.372	–0.518	0.535	0.253	0.410
特征值 Eigen value	4.99	3.18	2.62	1.43	1.14
贡献率 Contribution rate (%)	29.34	18.70	15.42	8.41	6.73
累计百分率 Cumulative percentage (%)	29.34	48.04	63.47	71.87	78.60

3 讨论与结论

在高氮背景下，氮素较多地积累在茎秆、叶片等非产量器官中，使水稻出现“奢侈耗氮”现象[18]。适当降低水稻氮肥用量，不仅不会减产，甚至还有可能增产。大田不施氮或施低氮条件下，水稻能充分发挥氮效率遗传差异潜力[19–20]；但选择压力过大，不同基因型间的植株氮利用效率的变异系数小，高效基因型的优势得不到发挥，不利于氮高效品种的筛选[21]。本研究表明，适当施氮促进水稻群体穗、茎秆、叶氮含量的增加和单株干物质总量(包括单株穗重、单株茎秆重与单株叶重)的提高。氮素利用效率性状在施低氮(150 kg·hm^{-2})条件下的变异系数较大。可以看出，重组自交系群体氮效率基因型间差异筛选同样遵循在低氮条件下其他材料的大田筛选规律。冯洋等[22]在对水稻地上部氮累积量的研究中发现，在 180 kg·hm^{-2} 氮处理下，不同生育期高效品种与低效品种间普遍没有显著性差异。本研究表明，单株氮积累总量在 2 种氮水平下与氮素干物质生产效率相关性不显著，也表现出聚类分析的组间差异不显著，这与晏娟等[23]研究结果相似，而与曹洪生等[4]研究结果不同，这可能与后者选用材料范围有关。通过聚类还从群体中筛选出典型的氮高效品系如 Q149 与氮低效品系 Q114 等共 13 个，为进一步研究水稻氮高效利用生理生化及分子生物学机制提供了材料基础。

一种快速而又可靠的鉴别氮高效利用水稻种质的方法对于选育氮高效利用水稻新品种是十分必要的。有关鉴别氮高效利用水稻的指标研究已有大量报道。一般认为株高可以作为预测水稻品种氮素利用效率(氮素干物质生产效率)的指标[24]。株高、有效穗数、生物产量、单株产量和结实率可作为耐低氮水稻材料的筛选指标[25]。本研究表明，植株的高矮对氮素干物质生产效率产生明显影响，对氮素籽粒生产效率影响不大。氮素籽粒生产效率与单株谷重呈正相关。通过主成分分析表明，第 1 主成分为氮的利用因子。氮利用效率较高时，植株体内氮含量较低，尤其是茎秆氮含量。第 2 主成分为氮的吸收因子。单株氮素积累总量与单株穗重、单株茎秆重和单株叶重密切相关。朴钟泽等[26–27]研究认为，在氮高效水稻育种中，产量作为氮素利用效率的间接选择性状，在施氮和未施氮条件下均有较好的选择效果。在考虑植株氮素吸收总量和稻谷产量的同时，也应从农艺性状选择上注重考虑大穗、高收获指数和较高的结实率。本研究综合相关与主成分分析得出：在低氮条件下，选择植株较高，穗较长，单株茎秆较重且茎秆和穗中氮含量较低的品系有利于氮素干物质生产效率的提高。选择穗数较多、穗总粒数与结实率较高且叶氮含量与单株叶重较低的品系有利于提高氮素籽粒生产效率。

因此，在氮高效利用水稻新品种培育中，大田低氮(150 kg·hm^{-2})条件下，要注重筛选植株较高、茎秆较重的重穗型(穗较长，穗总粒数较多，结实率较高)株系；且具有较低茎秆与穗氮含量，尤其是较低的茎秆氮含量，将有利于选育出氮高效利用水稻新品种。

参考文献 References

[1] Kamprath E J, Moll R H, Rodriguez N. Effects of nitrogen fertilization and recurrent selection on performance of hybrid populations of corn[J]. Agronomy Journal, 1982, 74(6): 955–958

[2] Bi Y M E, Kant S, Clark J, et al. Increased nitrogen-use efficiency in transgenic rice plants over-expressing a nitrogen-responsive early nodulin gene identified from rice expression profiling[J]. Plant, Cell & Environment, 2009, 32(12): 1749–1760

[3] Dawson J C, Huggins D R, Jones S S. Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems[J]. Field Crops Research, 2008, 107(2): 89–101

[4] 曹桂兰, 张媛媛, 朴钟泽, 等. 水稻不同基因型耐低氮能力差异评价[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(3): 316–320
Cao G L, Zhang Y Y, Piao Z Z, et al. Evaluation of tolerance to low N-fertilized level for rice type[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2006, 7(3): 316–320

[5] 冯涛, 杨京平, 孙军华, 等. 两种土壤不同施氮水平对稻田系统的氮素利用及环境效应影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 64–67
Feng T, Yang J P, Sun J H, et al. Effect of different nitrogen application levels on nitrogen utilization of paddy field system and environment impact under two soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 64–67

[6] 殷春渊, 张庆, 魏海燕, 等. 不同产量类型水稻基因型氮素吸收、利用效率的差异[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 39–50
Yin C Y, Zhang Q, Wei H Y, et al. Differences in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(1): 39–50

[7] 张耀鸿, 张亚丽, 黄启为, 等. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 616–621

Zhang Y H, Zhang Y L, Huang Q W, et al. Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 616–621

[8] 魏海燕, 张洪程, 张胜飞, 等. 不同氮利用效率水稻基因型的根系形态与生理指标的研究[J]. 作物学报, 2008, 34(3): 429–436
Wei H Y, Zhang H C, Zhang S F, et al. Root morphological and physiological characteristics in rice genotypes with different N use efficiencies[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(3): 429−436

[9] 程建峰, 蒋海燕, 刘宜柏, 等. 氮高效水稻基因型鉴定与筛选方法的研究[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(2): 175–182
Cheng J F, Jiang H Y, Liu Y B, et al. Methods for identification and screening of rice genotypes with high nitrogen efficiency[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2010, 24(2): 175–182

[10] 张传胜, 龙银成, 周娟, 等. 不同产量类型籼稻品种氮素吸收利用特征的研究[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 25(2): 17–21
Zhang C S, Long Y C, Zhou J, et al. Study on nitrogen uptake and use efficiency in different grain yield types of *Indica* rice (*Oryza sativa* L.) varieties[J]. Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition, 2004, 25(2): 17–21

[11] 董桂春, 于小凤, 赵江宁, 等. 不同穗型常规籼稻品种氮素吸收利用的基本特点[J]. 作物学报, 2009, 35(11): 2091–2100
Dong G C, Yu X F, Zhao J N, et al. General characteristics of nitrogen uptake and utilization in conventional *Indica* rice cultivars with different panicle weight types[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(11): 2091–2100

[12] 阮新民, 施伏芝, 罗志祥. 施氮对高产杂交水稻生育后期叶碳氮比与氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(2): 35–38
Ruan X M, Shi F Z, Luo Z Z. Effects of nitrogen application on the leaf of C/N and nitrogen uptake and utilization at later developmental stages in different high yield hybrid rice varieties[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011(2): 35–38

[13] 孙园园, 孙永健, 杨志远, 等. 不同形态氮肥与结实期水分胁迫对水稻氮素利用及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 274–281
Sun Y Y, Sun Y J, Yang Z Y, et al. Nitrogen use efficiency and yield of rice under different nitrogen and water stress conditions at grain-filling stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 274–281

[14] 汪和廷, 董慧, 齐龙昌, 等. 种植方式及施氮量对水稻灌浆初期氮代谢关键酶活性和产量性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1210–1214
Wang H T, Dong H, Qi L C, et al. Effects of cultivation method and nitrogen application rate on key enzyme activities of nitrogen metabolism at early milky stage and grain yield of rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(9): 1210–1214

[15] 阮新民, 施伏芝, 从夕汉, 等. 氮高效利用水稻碳氮代谢物含量的变化特征[J]. 作物杂志, 2015(6): 76–83
Ruan X M, Shi F Z, Cong X H, et al. Characteristics of carbon and nitrogen metabolites of rice genotype with high nitrogen use efficiency[J]. Crops, 2015(6): 76–83

[16] 黄宁. 关于主成分分析应用的思考[J]. 数理统计与管理, 1999, 18(5): 44–46
Huang N. The application and consideration about principal component analysis[J]. Application of Statistics and Management, 1999, 18(5): 44–46

[17] 游书梅, 曹应江, 郑家奎, 等. 73 份亚洲水稻恢复系农艺性状的主成分与聚类分析[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(2): 250–256
You S M, Cao Y J, Zheng J K, et al. Principal component and cluster analysis for agronomic traits of 73 rice restorers lines in Asia[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(2): 250–256

[18] 刘立军, 徐伟, 唐成, 等. 土壤背景氮供应对水稻营养元素吸收和籽粒中营养元素含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 343–349
Liu L J, Xu W, Tang C, et al. Effect of indigenous nitrogen supply of soil on the grain yield and fertilizer-N use efficiency in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2005, 19(4): 343–349

[19] Inthapanya P, Sihavong P, Sihathep V, et al. Genotype differences in nutrient uptake and utilisation for grain yield production of rainfed lowland rice under fertilised and non-fertilised conditions[J]. Field Crops Research, 2000, 65(1): 57–68

[20] 单玉华, 王海候, 龙银成, 等. 不同库容量类型水稻在氮素吸收利用上的差异[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 25(1): 41–45
Shan Y H, Wang H H, Long Y C, et al. Differences of nitrogen uptake and utilization in rice lines with various sink potentials[J]. Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition, 2004, 25(1): 41–45

[21] Tirol-Padre A, Ladha J K, Singh U, et al. Grain yield performance of rice genotypes at suboptimal levels of soil N as affected by N uptake and utilization efficiency[J]. Field Crops Research, 1996, 46(1/3): 127–143

[22] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 等. 我国南方主推水稻品种氮效率筛选及评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1051–1062
Feng Y, Chen H F, Hu X M, et al. Nitrogen efficiency screening of rice cultivars popularized in south China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(5): 1051–1062

[23] 晏娟, 沈其荣, 尹斌. 施氮量对氮高效水稻种质 4007 的氮素吸收、转运和利用的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 107–114
Yan J, Shen Q R, Yin B. Effects of nitrogen application rate

on uptake, translocation and use of nitrogen by rice germ plasm 4007 high in nitrogen use efficiency[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(1): 107–114

[24] 张云桥, 吴荣生, 蒋宁, 等. 水稻的氮素利用效率与品种类型的关系[J]. 植物生理学通讯, 1989(2): 45–47
Zhang Y Q, Wu R S, Jiang N, et al. Relationship between the efficiency of utilization of nitrogen and types of variety of rice[J]. Plant Physiology Communications, 1989(2): 45–47

[25] 郑家奎, 文春阳, 张涛, 等. 耐低氮水稻材料筛选及筛选指标研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(16): 7361–7363
Zheng J K, Wen C Y, Zhang T, et al. Studies on the screening index for low nitrogen tolerant rice and its selection[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(16): 7361–7363

[26] 朴钟泽, 韩龙植, 高熙宗, 等. 水稻氮素利用效率的选择效果[J]. 作物学报, 2004, 30(7): 651–656
Piao Z Z, Han L Z, Koh H J, et al. Selection effect of nitrogen use efficiency in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(7): 651–656

[27] 朴钟泽, 韩龙植, 高熙宗. 水稻不同基因型氮素利用效率差异[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(3): 233–238
Piao Z Z, Han L Z, Koh H J. Variations of nitrogen use efficiency by rice genotype[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(3): 233–238